



## UNDÉCIMO ENCUENTRO REGIONAL IBEROAMERICANO DEL CIGRÉ – XI ERIAC

COMITÉ NACIONAL PARAGUAYO DEL CIGRE  
22 al 26 de mayo 2005 – Hernandarias – Paraguay

### PISTAS ALTERNATIVAS AL ANALISIS DE DGA PARA EL DIAGNOSTICO DE FALLAS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA

Eduardo Velázquez Castillo, Ms. Ing. (\*)  
Dpto. de Ingeniería Electrónica y Electromecánica  
Central Hidroeléctrica de Itaipú

Prof<sup>a</sup>. Nora Díaz Mora, Dra  
CECE - Laboratório de Materiais - LAMAT  
UNIOESTE - FOZ DO IGUAÇU – PR

**Resumen** - El aceite mineral aislante continúa destacándose como el principal indicador de la "salud" de los transformadores de potencia, a tiempo que el Análisis de Gases Disueltos en el Aceite - DGA, viene siendo uno de los más conocidos recursos de los expertos para la emisión de diagnósticos de fallas incipientes en esos equipos. En ese sentido, la consulta de la literatura actual permite verificar que la mayoría de las publicaciones sobre el desempeño de transformadores de potencia, está orientada principalmente al perfeccionamiento de los métodos de interpretación de los datos de DGA, sea por técnicas computacionales o de inteligencia artificial, métodos estadísticos y la combinación de ambas herramientas, a partir de datos de análisis cromatográfica del aceite aislante, por medio de ensayos off-line y más recientemente de sistema de monitoreo on-line.

Sin embargo, a partir de un análisis del histórico de fallas de los transformadores principales de los generadores de la Central Hidroeléctrica de Itaipu - CHI, estos autores llegaron a la constatación de que en torno de 80% de los casos, el tradicional indicador del estado operativo de los transformadores, el DGA, no diagnosticó indicios de fallas incipientes, considerando operación normal del transformador.

De esa constatación, se discute en este trabajo la imperiosa necesidad de buscar nuevas pistas indicadoras de fallas inminentes en esos equipos.

El análisis del apareamiento de la Descarga Electroestática es discutida aquí como una de las posibles causas de fallas en transformadores de potencia con sistema de refrigeración del tipo Agua Forzada Aceite Forzado (WFOF y WFOD). Las Descargas Electroestáticas son consecuencias del fenómeno de la electrificación estática en las interfaces metal/aceite y aceite/papel inducidas por el

flujo del aceite mineral aislante, fenómeno éste que surge del calor generado por el roce de las interfaces.

**Palabras-clave:** Fallas, Transformador de Potencia, Electrificación Estática, Descarga Electroestática, Aceite Mineral Aislante, DGA.

#### 1 INTRODUCCIÓN

Los transformadores son uno de los principales componentes en un sistema de potencia y desempeñan un papel fundamental en las etapas que anteceden a la entrega de energía eléctrica a los consumidores finales. Tratándose de centrales hidroeléctricas, una falla en esos transformadores, además de ocasionar la pérdida de una gran capacidad de transformación de energía, podrá acarrear graves consecuencias y en el caso de la Itaipu Binacional, debido a su importancia energética/operacional, inclusive ocasionar problemas de estabilidad del sistema interconectado nacional tanto del sector eléctrico brasileño como paraguayo [1].

Además de los perjuicios en la calidad de energía, están envueltos elevados costos en la recuperación, reparación en fábrica o compra de nuevos equipos y pérdidas debido al lucro cesante, hasta la retomada de la condición operativa normal [2].

Debemos aun llevar en consideración que todo esto está ocurriendo en un momento en que un mayor control viene siendo realizado por el agente nacional, para mantener o mejorar la calidad del suministro de energía eléctrica, estableciendo pesadas multas a las concesionarias que no cumplan sus metas [3].

Por otro lado, debido a que los transformadores principales de los generadores de la Central Hidroeléctrica de Itaipu tienen localización subterránea y la parte activa de los mismos estén sumergidos en

(\*) Central Hidroeléctrica de Itaipu - Hernandarias - Alto Paraná - Paraguay  
Telef.: 061-5993648, Fax: 061-5993656, e-mail: evc@itaipu.gov.py

grandes volúmenes de aceite aislante (de 30.000 a 42.000 litros), fallas incipientes que no fueran detectadas en tiempo hábil pueden resultar en explosiones frecuentemente acompañadas de incendios y fuga de aceite, arriesgando la integridad de las personas y el medio ambiente, además de provocar severas e incalculables consecuencias a los demás equipos y sistemas instalados en la Casa de Máquina.

El aumento de la confiabilidad de los sistemas de potencia o de los equipos eléctricos no es proporcional al crecimiento anual de la generación de energía. La previsión de crecimiento total de consumo de energía eléctrica en el Brasil para el periodo de 2000 a 2009, por ejemplo, es de orden de 4,7% al año, o sea, de los actuales 64.300 MW para 109.400 MW, incluyendo las parcelas de energía importadas a través de interconexiones con países vecinos, como apuntado por NUNES [4].

Con la finalidad de mejorar esa diferencia vienen siendo implementadas mejores metodologías de mantenimiento y diagnóstico de fallas incipientes, entre otras, de las siguientes maneras:

- Introducir el Mantenimiento Basado en la Confiabilidad como complemento al Mantenimiento Preventivo Periódico, como propuesto por VELÁZQUEZ [5] y NUNES [4]
- Mejorar los métodos de monitoreo *on-line*, en combinación con las ventajas de los métodos eléctricos, acústicos, mecánicos y químicos con la finalidad de detectar defectos y deterioración incipiente del aislamiento, a ejemplo de las propuestas desarrolladas, entre otros por ISLAM, y LEDWICH [6], BO, AGGARWAL et al. [7], BIRLASEKARAN y XINDZHOU et al. [8].

En ese sentido, además de las herramientas estadísticas y computacionales tradicionales, con el desarrollo de las ciencias de la computación en el área de la inteligencia artificial, herramientas con la aplicación de Sistemas Expertos, Lógica Fuzzy y Redes Neuronales Artificiales, disponibles o en desarrollo actualmente, se presenta como una vía para aumentar la confiabilidad y la calidad de los diagnósticos de fallas incipientes en transformadores de potencia por medio del DGA (Análisis de Gases Disueltos en el Aceite) que ayuden al especialista en la tomada de decisión [9].

Sin embargo el DGA, a pesar de ser el método más utilizado en el monitoreo de las condiciones de operación de los transformadores, no provee una conclusión final sobre el tipo o localización de la falla [10,11] y por tanto los ensayos eléctricos y otros parámetros adquiridos por el sistema de monitoreo *on-line*, así como medidas para la localización de las descargas parciales también deben ser integradas para la emisión del diagnóstico [10].

En este trabajo fue realizado un análisis de las fallas en transformadores de potencia usando datos reales de ensayos efectuados en los transformadores principales de los generadores de la Central Hidroeléctrica de la Itaipu Binacional, que acusaron fallas francas, y fueron

retirados de operación y enviados a la fábrica para reparaciones.

## 2 TRANSFORMADORES DE LA ITAIPU

La Central Hidroeléctrica de Itaipu es un emprendimiento binacional desarrollado por el Brasil y el Paraguay en el Río Paraná (ENGINEERING FEATURS ITAIPU, 1994). La potencia instalada actualmente de la Central es 12.600 MW (megawatts), con 18 unidades generadoras de 700 MW cada una, siendo 9 de ellas en 50 Hz y 9 en 60 Hz. Actualmente se encuentran en proceso de instalación dos nuevas unidades generadoras, 9A (50 Hz) y 18A (60Hz); Itaipu pasará entonces a tener una capacidad instalada de 14.000 MW a partir de mediados de 2005. A ese proceso de generación se encuentra asociado el proceso de transformación por medio de los transformadores principales de los generadores.

Los transformadores principales de los generadores son utilizados para elevar la tensión de 18 kV en la salida de los generadores a la tensión nominal del sistema de transmisión de 500 kV a partir de la Subestación Aislada a Gas (GIS), que se conecta a la Subestación de la Margen Derecha (SEMD), en 50 Hz (Paraguay) y a la Subestación Conversora de FURNAS en Foz do Iguaçu, en 60 Hz. (Brasil). Cada transformador monofásico está instalado en una celda de concreto a prueba de explosión e incendio, en la galería de aguas abajo a una elevación 108,00 m.

Dentro de la celda, el transformador está montado sobre un pozo que posee una capa de piedra triturada de 1,10 m de profundidad con drenaje hasta los tanques de concreto en la elevación 90,00 m, cerca de las unidades U3, U7, U10, U14 y U18. Cada celda posee ventilación forzada y una puerta corta-fuego, en la parte frontal, con cierre automático. El transformador posee un sistema principal de protección contra incendio por agua nebulizada y un sistema de protección secundario por CO<sub>2</sub>.

### 2.1 Análisis de Fallas

La TABLA I presenta la secuencia de entrada en operación de las unidades generadoras de la Central Hidroeléctrica de Itaipu. Los datos indican que la primera unidad está con 20 años de operación y la última con 13 años.

La tasa de falla media de los transformadores principales de los generadores de la Itaipu (50 y 60 Hz) es 50% menor que la tasa de falla media de los transformadores de potencia del sector eléctrico brasileño. A pesar de que la tasa de falla correspondiente a la Itaipu sea bien menor que la media del Brasil, debe considerarse que debido a la inercia del generador, y por estar sujetos a las desconexiones periódicas para mantenimiento, estos transformadores son más solicitados y debido a su localización, una falla acarrearía graves consecuencias.

TABLA I. ENTRADA EN OPERACIÓN DE LOS GENERADORES DE LA ITAIPU [12].

UNIDADES 50 Hz.	FECHA	UNIDADES 60 Hz.	FECHA
01	19-03-84	10	31-08-89
02	27-12-84	11	28-06-89
03	20-08-85	12	02-02-89
04	17-12-85	13	09-09-88
05	04-05-87	14	15-12-86
06	16-07-87	15	11-11-86
07	23-10-87	16	07-06-90
08	23-02-88	17	09-01-91
09	14-07-88	18	08-04-91

Como puede observarse en la TABLA II, hasta 1990 se había producido solamente una falla durante la operación. La misma consistió en la falla de un bobinado de AT durante la operación normal sin maniobra. Esto resultó en una descarga de aceite a través de la válvula de alivio de presión y una distorsión del tanque junto con averías en los bobinados.

De acuerdo a los datos del histórico de los ensayos cromatográficos, el DGA no indicaba ninguna anomalía en el funcionamiento del transformador. El transformador fue enviado a la fábrica para investigación y reparación, pero la causa de la falla no fue totalmente determinada.

TABLA II. FALLAS OCURRIDAS EN LOS TRANSFORMADORES DE ITAIPU [12]

TRAFO	Nº SÉRIE	FALLA	FABR
TU 01, φ R	500820	18/10/1987	1982
TU 11, φ A	SP15103	26/04/1990	1987
TU 17, φ C	100296/4	26/04/1993	1989
TU 08, φ T	500843	04/05/1997	1984
TU 07, φ R	501857	12/07/2001	1993
TU 01, φ R	500820	10/11/2002	1993
TU 15, φ B	SP15090	20/06/2003	1982

En la TABLA III, son resumidas las condiciones de operación y los resultados del análisis de DGA de los transformadores que sufrieron fallas y que fueron citados en la TABLA II

TABLA III. DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN LOS TRANSFORMADORES DE LA ITAIPU

TRAFO	FALLA	OPERACIÓN*	DGA
TU 01, φ R	1987	normal 695 MW	normal
TU 11, φ A	1990	excitación con 6 kV	normal
TU 17, φ C	1993	normal 665 MW	anormal
TU 08, φ T	1997	energización	normal
TU 07, φ R	2001	normal 714 MW	normal
TU 01, φ R	2002	normal 634 MW	normal
TU 15, φ B	2003	normal retirado	anormal <i>monitoring</i>

\* Condiciones de operación en el momento de falla

En el caso del transformador TU 07, fase R, de 50Hz, por ejemplo, que sufrió falla en 2001, puede constarse que la misma ocurrió durante la operación normal (714MW) y sin ocurrencia de maniobra, en el caso de esta unidad, y como mostrado en la tabla, el DGA no indicaba anomalía en el funcionamiento del transformador. Apenas en el caso de los transformadores TU 17, fase C y TU 15, fase B, los resultados de DGA indicaban anomalía en el funcionamiento del transformador, pero en el primer caso, existía una cierta discrepancia entre el diagnóstico del fabricante y la Itaipu, ya que el fabricante consideraba la operación del transformador bajo control. En el segundo caso, ocurrido en 2003, se debe considerar que el sistema de monitoreo de gases disueltos ya estaba en operación en forma experimental, lo cual, debido al aumento de acetileno detectado, permitió la retirada de operación del transformador antes que ocurriera falla y fue enviado a la fábrica para reparación.

A partir del análisis general de los datos de la TABLA III y de la consulta al histórico de fallas de los transformadores principales de los generadores de la Central Hidroeléctrica de Itaipu, se puede constatar que en torno del 80% de los casos, el indicador tradicional del estado operativo de los transformadores, o sea, el DGA, no diagnosticó indicios de falla incipiente.

Es muy probable, que en el momento de la toma de decisión sobre el estado operativo de los transformadores, los ingenieros de mantenimiento deparen con dos grandes limitaciones cuando eso debe ser realizado de forma inmediata y precisa: no contar con todas las informaciones necesarias con la debida exactitud y rapidez, y sentirse inducidos a análisis simplistas para la emisión de diagnósticos por la mayoría de los criterios disponibles (Razón de Gases, IEC, PUGH, NBR, ROGERS, etc) ya que los mismos,

como citado por PRADENAS [13], son apenas de orientación y no totalmente conclusivos, por tanto éstos análisis siempre deben ser correlacionados y comparados con otras informaciones, visto que muchas veces fallan en la emisión de los diagnósticos.

A pesar que el sistema de monitoreo *on-line* provea los datos de una forma inmediata, con lo cual puede suplir parte de las deficiencias encontradas en la emisión de diagnósticos de fallas en transformadores por medio del análisis cromatográfico *off-line*, su reciente implementación dificulta la evaluación completa de su eficiencia y contribución en la reducción del índice de fallas; así en el contexto actual, es válido la búsqueda de nuevas pistas indicadoras de fallas inminentes en esos equipos.

### 3 DESCARGAS ELECTROSTATICAS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA

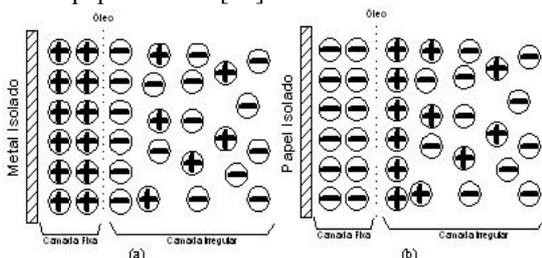
Existe documentado en la literatura, un gran número de casos de fallas de transformadores cuyas causas fueron atribuidas al surgimiento de descargas electrostáticas, entre otros, pueden ser citados los trabajos de las referencias [14 - 19]. Son indicios comprobatorios de descargas electrostáticas, numerosas fallas de transformadores con trazos de erosión y descargas en la superficie de los materiales aislantes.

De acuerdo a los trabajos de la literatura analizados, las Descargas Electroestáticas en grandes transformadores de potencia con sistema de refrigeración forzado a aceite, surgen del calor generado por el roce entre las interfaces metal/aceite y aceite/papel inducidas por el flujo de aceite de alta resistividad en los conductos de refrigeración del conjunto del transformador en contacto con la superficie sólida del papel prensado que aísla los bobinados.

El calor generado es suficiente para romper el flujo de la doble camada en iones libres de cargas iguales bajo el efecto de la tensión de cizalle. El acumulo de estas cargas conduce a un aumento del potencial de corriente continua (resultante tanto de las cargas de superficie como de volumen) y causa muchas micro descargas, las cuales finalmente completan el escenario de falla del transformador, esto es, el campo eléctrico excede un valor crítico.

En la Figura 1 se ilustra el mecanismo de generación de cargas estáticas.

Fig. 1: Doble camada eléctrica y distribución de iones en las interfaces (a) aceite/metal aislado, y (b) aceite/papel aislado [17].

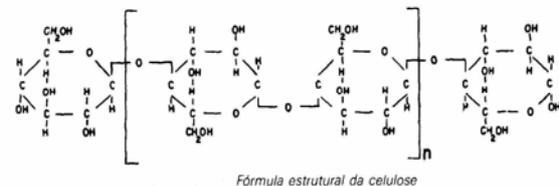


El flujo de cargas depende de las características individuales tanto del líquido (aceite) como del sólido (metal o papel).

En el aceite mineral aislante, generalmente existe el mismo número de cargas positivas y negativas que crean la condición de neutralidad eléctrica. Cuando la fase sólida es un metal aislado, debido a que el mismo posee un número de electrones libres, éstos atraen algunos iones que se acumulan en la superficie, quedando así la camada del aceite aislante cargada negativamente, como mostrado en la Fig 1(a). En cambio, si la electrificación es causada por el flujo de aceite aislante en la superficie del papel, la camada de aceite aislante quedará cargada positivamente, como mostrado en la Fig 1(b).

El mecanismo de electrificación en el caso de la interface aceite/papel puede ser entendido observando la fórmula estructural de la celulosa mostrada en la Figura 2, cuya fórmula general es  $(C_6H_{12}O_5)_n$ , que consiste de una cadena polimérica de unidades de benzeno que sustentan seis grupos hidroxila (OH<sup>-</sup>). La importancia de éste fenómeno es destacada dado que la mayor parte de la aislación sólida de los transformadores es constituida de papel y por tanto de naturaleza celulósica.

Fig 2: Fórmula estructural de la celulosa [20]



Así, los átomos de hidrogeno cargados positivamente en esos grupos (OH<sup>-</sup>) tienen una alta afinidad como los iones negativos del aceite, resultando en la absorción de iones negativos en la superficie del papel. Y como es sabido, el papel aislante tiene una elevada tendencia a absorber impurezas del aceite, impurezas éstas que podrían ser vistas como compuestas de exceso de electrones.

Son varios los factores que influncian en la generación de esas descargas electrostáticas, entre ellos, la temperatura del aceite, el caudal y la velocidad del aceite, la turbulencia del aceite, el tipo de contaminantes, la tendencia de cargarse dependiendo del origen del aceite, las condiciones de superficie del aislamiento sólido, la energización, la resistencia del dieléctrico en movimiento, la migración de mezclas y otros.

Para evaluar la influencia de descargas electrostáticas en la incidencia de fallas en transformadores de potencia de la Itaipu Binacional, se hace necesario, además de un estudio microscópico detallado para el entendimiento del fenómeno de electrificación, un estudio macroscópico con el fin de cuantificar la

dependencia de la ocurrencia de electrificación estática característica en condiciones de flujo laminar, turbulento, varios niveles de caudal de fluido pasando por las interfaces metal/aceite y aceite/papel, temperatura y voltaje aplicado, así como la dependencia con las propiedades físicas y químicas del aceite, y otros. Y finalmente, de ésta forma correlacionar los resultados obtenidos con las fallas ocurridas en los transformadores de la Itaipu Binacional.

#### 4 CONCLUSIONES

- Un análisis general del histórico de fallas de los transformadores principales de los generadores de la Central Hidroeléctrica de Itaipu, indicó que en torno de 80% de los casos, el Análisis de Gases Disueltos (DGA) de los datos del histórico de cromatografía *off-line*, no diagnosticó indicios de fallas incipientes.
- Una de las posibles causas de las fallas, caracterizadas como "muerte súbita", esto es, fallas repentinas, de transformadores de potencia con sistema de refrigeración do tipo Agua Forzada, Óleo Forzado (WFOF y WFOD), puede ser atribuida al fenómeno de Descargas Electroestáticas.
- Para evaluar la influencia de las Descargas Electroestáticas en la incidencia de fallas en los transformadores principales de los generadores de la Itaipu Binacional, se hace necesario, un estudio microscópico del fenómeno y un estudio macroscópico para cuantificar la ocurrencia de electrificación estática en función de las condiciones de operación y de las propiedades físicas y químicas del aceite y correlacionar esos resultados con las fallas ocurridas.

Finalmente, cabe destacar que con este trabajo los autores pretenden alertar a los especialistas en transformadores de potencia, sobre la necesidad de la búsqueda de nuevas pistas indicadoras de fallas inminentes en esos equipos, así como motivar investigaciones específicas destinadas a explorar el desempeño de cada tipo de material que forman parte del conjunto transformador bajo el efecto de los principales parámetros envueltos en la operación y de ésta forma, aumentar la confiabilidad y la exactitud de los resultados.

#### 5 BIBLIOGRAFIAS

[1] VELÁZQUEZ, C.E. - Aplicação de Ontologia e Sistema Especialista para Diagnóstico de Falhas em Transformadores de Potência - Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC - Brasil, Novembro 2003.

[2] KIRTLEY, J. L. Jr.; HAGMAN, W.H.; LESIEUTRE, B. C. et al. - Monitoring the Health of Power Transformers. IEEE Computers Application in Power, 1996, pp.18-23.

[3] WESLEY, R. G. S. Isoladores de Linhas de Transmissão do Sistema Elétrico Brasileiro, Parte 2: Avaliação de Desempenho. X ERLAC. CIGRÉ X/PI-12.3. Puerto Yguazú - Argentina, 18-22 de maio, 2003.

[4] NUNES, E.L. Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC): Análise da Implantação em uma Sistemática de Manutenção Preventiva Consolidada. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC - Brasil, Outubro 2001.

[5] VELÁZQUEZ, C.E. M.C.C. Valiosa Herramienta para la Gerencia e Producción 1er Seminario Técnico del Area de Producción - SETAP ITAIPU BINACIONAL, Foz do Iguaçu 28-10 al 01-11-1996.

[6] ISLAM, S.M. and LEDWICH G. Locating Transformer Faults Through Sensitivity Analysis of High Frequency Modeling Using Transfer Function Approach. Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Montreal, Quebec, Canada, June 16-19, 1996.

[7] BO, Z.Q., AGGARWAL R.K. and JOHNS, A.T. A Novel Measurement Tecnique for Power Transformer Faults Using Spectral Comparison Tecnique. IEEE 1996.

[8] BIRLASEKARAN, S., XINGZHOU, Y., FETHERSTONE, F. et al. Diagnosis and Identification of Transformer Faults from Frequency Response Data. IEEE, 2000.

[9] GAO, N. ; YAN, Z. New Approach on Comprehensive Diagnosis of Insulation Faults in Power Transformer. Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Boston, Ma USA, April 7-10, 2002, pp. 203-206.

[10] WANG, Z. Artificial Intelligence Applications in the Diagnosis of Power Transformer Incipient Faults. Tesis for the Degree of PhD. Blacksburg-Virginia, August 8, 2000.

[11] YANG, H.T. and HUANG, Y.C. Intelligent Decision Support for Diagnosis on Incipient Transformer Faults Using Self-Organizing Polynomial Networks. IEEE transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 3, August 1998. pp. 946-952.

- [12] SOM - Descrição geral. Manual G01. Itaipu Binacional - Foz do Iguaçu, março 1995.
- [13] PRADENAS, L.A. - Grandes Transformadores - Experiencia de la Itaipu. MTSI.SU. Itaipu Binacional, marzo 1996.
- [14] SHIMIZU, S., MURATA, H. and HONDA, M. – Electrostatics in Power Transformer – IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol. PAS-98, No. 4, July/Aug 1979, pp.1244-1250.
- [15] RADWAN, R. M., EL-DEWIENY, R. M. and METWALLY, I. A. - Investigation of Static Electrification Phenomena due to Transformer Oil Flow in Electric Power Apparatus– IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol. 27, No. 2, April 1992, pp.278-286.
- [16] PEYRAQUE, L., BÉROUALD, A. and BURET, F. - Static Electrification of Pressboard/Oil Interface and Transient Phenomena – IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 5, No. 3, june 1998, pp.443-449.
- [17] METWALLY, I. A. – Characterization of Static Electrification in Power Transformers – IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 3, No. 2, April 1996, pp.307-315.
- [18] MOREAU, O. and TOUCHARD, G. G. - Experimental Study and Modeling of Static Electrification in Power Transformers – IEEE Transactions of Industry and Applications Vol. 37, No. 4, July/Aug 2001, pp.971-977.
- [19] PEYRAQUE, L., BOISDON, C., BÉROUALD, A. and BURET, F. - Static Electrification and partial Discharges Induced by Oil Flow in Power Transformers – IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 2, No. 1, february 1995, pp.40-45.
- [20] MILASCH, M. Manutenção de Transformadores em Líquido Isolante. Edgar Blücher; Itajubá - MG; Escola Federal de Engenharia, 1984.